

## Электронный парамагнитный резонанс скандия в карбиде кремния

© П.Г. Баранов, И.В. Ильин, Е.Н. Мохов, А.Д. Роевков, В.А. Храмцов

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 12 июля 1996 г.)

В кристаллах  $6H$ -SiC с примесью скандия обнаружены спектры ЭПР акцепторов скандия и ионов  $Sc^{2+}$  ( $3d$ ). Спектры ЭПР акцепторов скандия характеризуются сравнительно малыми константами сверхтонкого взаимодействия, соответствующими по своим значениям константам для других элементов группы III в SiC, акцепторов бора, алюминия и галлия. Спектры ЭПР акцепторов скандия претерпевают существенные изменения в области температур 20–30 К. В низкотемпературной фазе спектры ЭПР характеризуются орторомбической симметрией, тогда как высокотемпературная фаза имеет более высокую аксиальную симметрию. Спектры ЭПР, появляющиеся при температурах выше 35 К и приписанные нами ионам  $Sc^{2+}$  ( $3d$ ), или  $A^{2-}$ -состоянию скандия, имеют существенно большие константы сверхтонкой структуры и более узкие линии по сравнению со спектрами ЭПР акцепторов скандия. Параметры этих спектров ЭПР близки к параметрам  $Sc^{2+}$  ( $3d$ ) в ионных кристаллах и ZnS, тогда как параметры спектров ЭПР акцепторов скандия больше соответствуют параметрам дырок, локализованных на атомах третьей группы, в частности на атомах скандия в  $GeO_2$ . Сделан вывод о том, что атомы скандия во всех центрах занимают позицию кремния.

Скандий в карбиде кремния является акцепторной примесью и служит активатором высокотемпературной люминесценции. После введения скандия в  $6H$ -SiC  $n$ -типа в этом кристалле наблюдается интенсивная широкая полоса люминесценции, лежащая в желто-зеленой области спектра [1]. Предполагалось [2], что главный излучательный рекомбинационный канал обусловлен переходами в донорно-акцепторных парах или между зоной проводимости и акцептором, где донором является азот, а акцептором — скандий, т.е. была проведена аналогия с рекомбинационными процессами в SiC с примесью акцепторов бора, алюминия и галлия. Такая аналогия может иметь место, поскольку электронные конфигурации Sc ( $3d4s^2$ ) и B, Al и Ga ( $ns^2np$ ) (где  $n = 2, 3$  и 4 для B, Al и Ga соответственно) близки. В обоих случаях недостает одного электрона для образования ковалентных связей с окружающими ионами. Энергия ионизации для акцепторов скандия, полученная в результате исследований методом фотоемкостной спектроскопии [3], равна примерно 0.55 eV. Ранее на основании холловских и оптических измерений [4] положение акцепторного уровня скандия было оценено как 0.5–0.6 eV.

Следует отметить, что скандий является также переходным  $3d$ -элементом, его зарядовое состояние  $Sc^{3+}$  (или  $A^-$ ) является изоэлектронным, подобно нейтральному состоянию титана  $Ti^{4+}$  ( $A^0$ ), а в состоянии  $Sc^{2+}$  ( $A^{2-}$ ) имеется один неспаренный  $3d$ -электрон, такое состояние является парамагнитным.

В [5–7] были проведены исследования эпитаксиальных пленок  $6H$ -SiC:Sc и  $4H$ -SiC:Sc методом оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). В этих работах впервые наблюдался магнитный резонанс скандия, который регистрировался по изменению интенсивности широкой полосы люминесценции,

характерной для кристаллов с примесью скандия. Люминесценция была спиново-зависимой, и ее интенсивность увеличивалась в момент резонансных переходов между зеемановскими уровнями, вызванных поглощением микроволновой мощности. Предварительные результаты по исследованию ЭПР акцепторов скандия в  $6H$ -SiC изложены в [8,9]. Там же сделано предположение, что широкая полоса люминесценции и бесфононные линии, наблюдавшиеся в кристаллах с примесью скандия, частично обусловлены рекомбинацией экситонов, локализованных на изоэлектронных акцепторах скандия. При этом часть сигналов ОДМР соответствует таким экситонам со спином  $S > 1/2$ , вероятно, в триплетном состоянии с величиной расщепления тонкой структуры  $D \sim 0.7 \text{ cm}^{-1}$  [5–7].

### 1. Результаты экспериментов

В настоящей работе методом ЭПР исследованы кристаллы, в которых ранее наблюдались сигналы ОДМР. Скандий относится к медленно диффундирующим примесям в карбиде кремния. Поэтому получение образцов карбида кремния, легированных указанными примесями, осуществлялось в процессе выращивания кристаллов или эпитаксиальных слоев сублимационным сэндвич-методом в вакууме при температуре 1900–2000 °C [10,11]. Толщина выращенных слоев составляла 0.05–0.2 mm.

Исследовались эпитаксиальные слои  $6H$ -SiC, выращенные на кремниевой или углеродной стороне подложки и легированные скандием с концентрацией Sc порядка  $(1-3) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Концентрация некомпенсированных доноров азота в эпитаксиальных слоях  $n$ -типа составляла  $(7-8) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , а в эпитаксиаль-

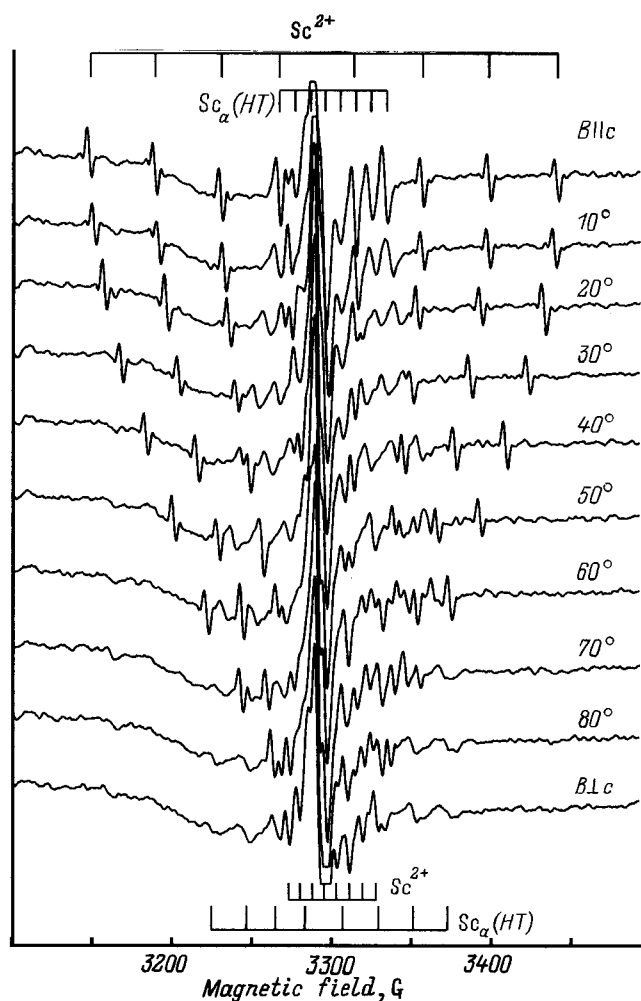


Рис. 1. Ориентационная зависимость спектров ЭПР, наблюдаемых в кристалле 6H-SiC:Sc, зарегистрированных в X-диапазоне при температуре 40 К. Вращение производилось в плоскости (1120) кристалла.

ных слоев p-типа концентрация некомпенсированных акцепторов была менее  $(5-6) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Измерения производились на радиоспектрометре ЭПР 3 см-диапазона (X-диапазон) при температурах 4–300 К.

На рис. 1 представлена ориентационная зависимость спектров ЭПР, наблюдавшаяся в кристалле 6H-SiC:Sc. Спектры зарегистрированы в X-диапазоне при температуре 40 К. Вращение кристалла производилось в плоскости (1120). Видно, что спектры существенно меняются с изменением угла  $\theta$  между направлением магнитного поля и гексагональной осью (c-осью) кристалла. Наблюдаются две группы по восемь эквидистантных линий в каждой группе, обозначенные на рис. 1 (для ориентаций  $\mathbf{V} \parallel \mathbf{c}$  и  $\mathbf{V} \perp \mathbf{c}$ ) как  $Sc_a(HT)$  и  $Sc^{2+}$ . Основания для такого обозначения будут представлены далее.

Природный скандий содержит только один стабильный изотоп  $^{45}\text{Sc}$  с ядерным спином  $I = 7/2$

и ядерным магнитным моментом, равным  $4.7491\mu_N$  ( $\mu_N$  — ядерный магнетон). Таким образом, спектр ЭПР должен состоять из одной или нескольких (учитывая кристаллографически неэквивалентные позиции в решетке 6H-SiC) групп линий равной интенсивности (по восемь эквидистантных линий в каждой группе), что и наблюдается на рис. 1. Расстояние между линиями в каждой группе определяется величиной сверхтонкого (СТ) взаимодействия неспаренного электрона с ядерным магнитным моментом скандия.

Спектры типа  $Sc^{2+}$  характеризуются более узкими линиями и существенно бóльшим максимальным расщеплением между линиями, чем  $Sc_a(HT)$ . Для увеличения относительной интенсивности сигнала  $Sc_a(HT)$  была выбрана амплитуда модуляции 4 Г, что привело к некоторому уширению сигнала  $Sc^{2+}$  и искажению формы линии. Обращают на себя внимание противоположные зависимости расщепления между линиями от угла  $\theta$ : для  $Sc^{2+}$  максимальное расщепление между линиями наблюдается для ориентации  $\mathbf{V} \parallel \mathbf{c}$ , а минимальное — для ориентации  $\mathbf{V} \perp \mathbf{c}$ , тогда как в случае  $Sc_a(HT)$  зарегистрирована противоположная зависимость. В спектре ЭПР  $Sc^{2+}$ -центров имеются слабые сателлиты по обеим сторонам каждой линии. При углах  $\theta$ , превышающих  $30^\circ$ , между основными линиями СТ-структуры  $Sc^{2+}$ -центров появляются линии, соответствующие запрещенным переходам, что свидетельствует о сравнительно сильных квадрупольных взаимодействиях. Спектры ЭПР центров  $Sc^{2+}$  и  $Sc_a(HT)$ , представленные на рис. 1, могут быть проанализированы с помощью аксиальной модификации следующего спинового гамильтониана:

$$H = \mu_B \mathbf{BgS} + \mathbf{SAI} - g_I \mu_N \mathbf{BI}, \quad (1)$$

где электронный и ядерный спины равны  $S = 1/2$  и  $I = 7/2$  соответственно,  $\mathbf{g}$  и  $\mathbf{A}$  — тензорные величины, характеризующие электронный g-фактор и СТ-взаимодействие с ядром скандия,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $g_I$  — ядерный g-фактор скандия. Ось  $z$  или параллельная ось направлена вдоль c-оси кристалла, оси  $x$  и  $y$  лежат в перпендикулярной c-оси плоскости. Ось  $x$  лежит в одной из плоскостей  $\{11\bar{2}0\}$ , ось  $y$  направлена перпендикулярно этой плоскости. Параметры спинового гамильтониана (1) для центров  $Sc^{2+}$  и  $Sc_a(HT)$ , обладающих аксиальной симметрией вдоль c-оси кристалла, имеют следующие величины: для  $Sc^{2+}$   $g_{\parallel} = 2.0047$ ,  $g_{\perp} = 2.0002$ ,  $A_{\parallel} = 44.6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_{\perp} = 8.4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ; для  $Sc_a(HT)$   $g_{\parallel} = 2.0016$ ,  $g_{\perp} = 2.0011$ ,  $A_{\parallel} = 10.1 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_{\perp} = 22.6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ . Приведены абсолютные значения констант СТ-взаимодействия.

При понижении температуры спектры существенно изменяются. На рис. 2 представлены температурные зависимости спектров ЭПР в кристалле 6H-SiC:Sc, зарегистрированные в ориентациях  $\mathbf{V} \parallel \mathbf{c}$  (a) и

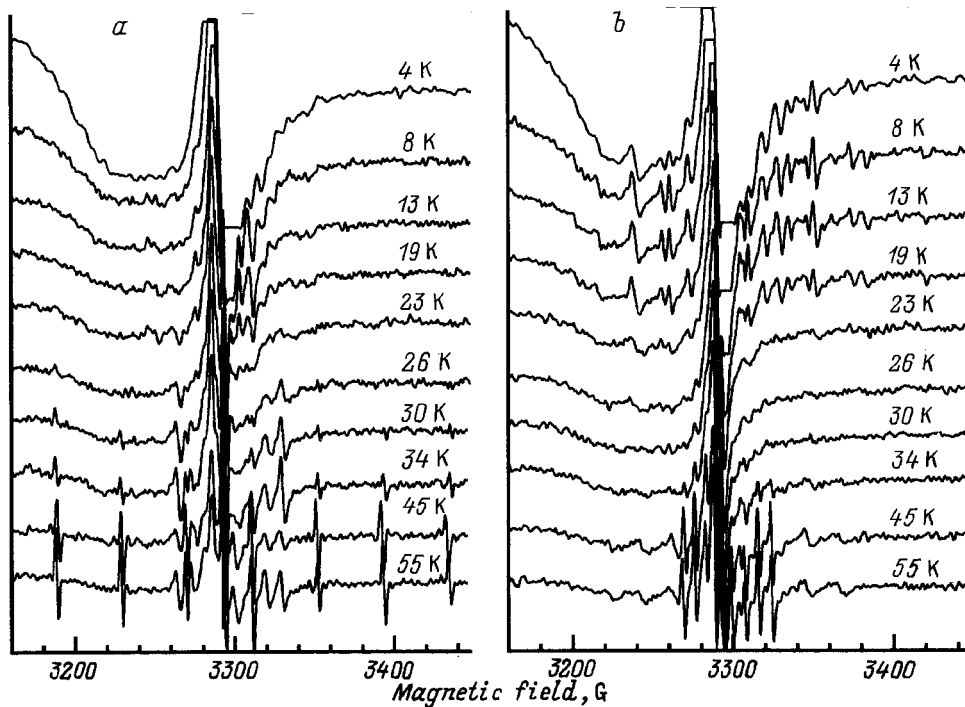


Рис. 2. Температурная зависимость спектров ЭПР в кристалле  $6H\text{-SiC:Sc}$ , зарегистрированных в  $X$ -диапазоне для двух ориентаций.

$a - \mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$ ,  $b - \mathbf{B} \perp \mathbf{c}$ .

$\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$  ( $b$ ), амплитуда модуляции — 1 Г. Видно, что при понижении температуры спектры ЭПР центров  $\text{Sc}^{2+}$  и  $\text{Sc}_a(\text{HT})$  исчезают и появляются по крайней мере два новых спектра ЭПР, также связанных со скандием. Обращает на себя внимание трансформация формы спектра ЭПР  $\text{Sc}_a(\text{HT})$ -центров в области температур 40–25 К. Особенно это проявляется в ориентации  $\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$ . При понижении температуры в этой области нарушается одинаковая интенсивность компонент СТ-структуры, а относительная интенсивность крайних компонент резко увеличивается (рис. 2,  $b$ ), затем линии уширяются и ниже 20 К появляется новый спектр ЭПР. Такое поведение спектра ЭПР свидетельствует о динамической природе преобразования центров  $\text{Sc}_a(\text{HT})$ . В то же время исчезновение спектров ЭПР центров  $\text{Sc}^{2+}$  не сопровождается какими-либо изменениями по форме этих спектров, что, по-видимому, свидетельствует о простом перезаселении уровней этих центров с изменением температуры. Из рисунков следует, что низкотемпературные спектры акцепторов скандия (обозначенные как  $LT$  — low temperature) преобразуются в высокотемпературный спектр ( $HT$  — high temperature) акцепторов скандия  $\text{Sc}_a(\text{HT})$  с переходной областью между двумя фазами 20–30 К.

Низкотемпературные спектры ЭПР представлены на рис. 3,  $a$ , где приведены их ориентационные зависимости. Измерения проводились в  $X$ -диапазоне при

температуре 4 К. Вращение производилось в плоскости (1120) кристалла. Низкотемпературные спектры характеризуются более низкой симметрией. Ранее [8,9] в кристаллах  $6H\text{-SiC:Sc}$  нами наблюдался только один тип спектров ЭПР акцепторов скандия, приведенный на рис. 3,  $b$  в том же масштабе и обозначенный как  $\text{Sc}_{a1}(LT)$ . Среди более сложных низкотемпературных спектров, приведенных на рис. 3,  $a$ , могут быть выделены слабые сигналы ЭПР акцепторов скандия  $\text{Sc}_{a1}(LT)$ . На рис. 3 вертикальными метками указана только одна группа линий, принадлежащая центру  $\text{Sc}_{a1}(LT)$ ; вторая группа (с меньшим СТ-расщеплением) не указана. Спектры  $\text{Sc}_{a1}(LT)$  были проанализированы с помощью спинового гамильтониана (1). Как было показано в [8], имеются три магнитно-неэквивалентных положения дефекта, соответствующие трем плоскостям типа {1120}. Параметры спинового гамильтониана, описывающие наблюдаемые спектры, имеют следующие величины:  $g_x = 2.001$ ,  $g_y = 2.016$ ,  $g_z = 2.008$ ,  $A_x = 15.0 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_y = 3.0 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_z = 5.0 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ . Точность определения  $g$ -факторов  $\pm 0.002$ , констант СТ-взаимодействия  $\pm 0.2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ . Приведены абсолютные значения констант СТ-взаимодействия.

Кроме центров  $\text{Sc}_{a1}(LT)$  на рис. 3,  $a$  видны более интенсивные низкотемпературные спектры акцепторов скандия, обозначенные как  $\text{Sc}_a(LT)$ . В  $X$ -диапазоне

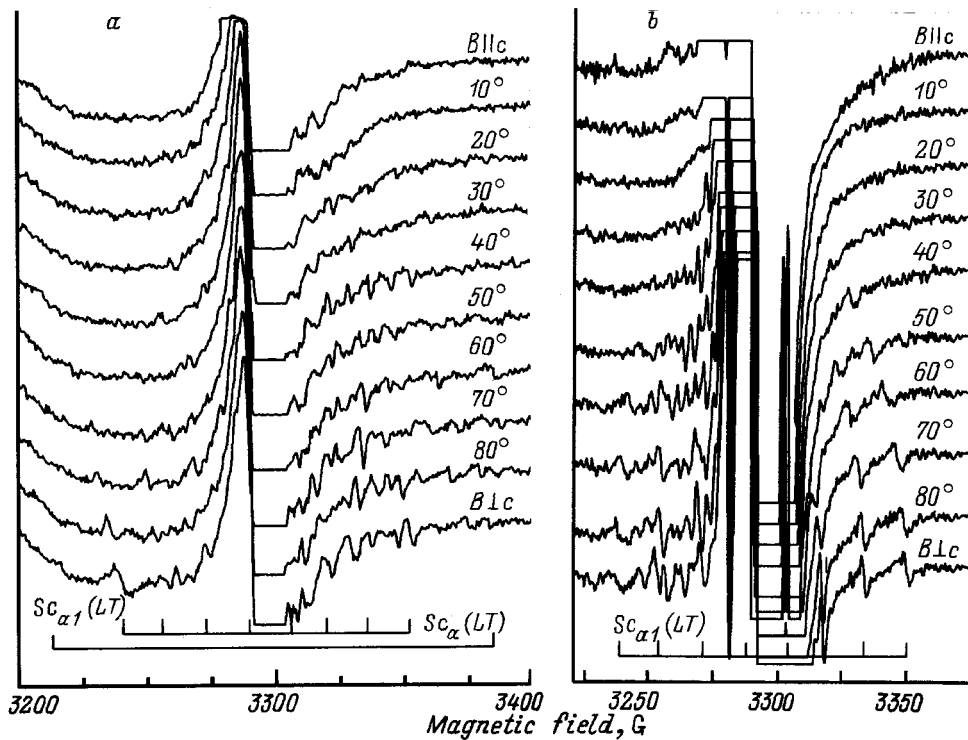


Рис. 3. Ориентационная зависимость спектров ЭПР, наблюдаемых в кристалле  $6H\text{-SiC:Sc}$  (а) и в том же кристалле, в котором наблюдался только один тип акцепторов скандия (б), зарегистрированных в  $X$ -диапазоне при температуре 4 К. Вращение производилось в плоскости  $(11\bar{2}0)$  кристалла.

из-за малых изменений  $g$ -фактора трудно однозначно проанализировать эти спектры и сделать вывод о том, одному или двум типам скандия принадлежат эти спектры (кроме акцепторов  $Sc_{\alpha_1}(LT)$ ). Весьма вероятно, что имеются два типа центров акцепторов скандия, характеризующихся одной и той же симметрией, но отличающихся параметрами спинового гамильтониана (1). При этом локальная ось  $z$  центра направлена вдоль одной из трех осей связей Si-C (не совпадающих с осью  $c$ ). Ось  $x$  направлена перпендикулярно оси  $z$  и лежит в одной из плоскостей типа  $\{11\bar{2}0\}$ , ось  $y$  направлена перпендикулярно соответствующей плоскости.

В кристалле  $6H\text{-SiC}$  имеются одна гексагональная ( $h$ ) и две квазикубические ( $k_1, k_2$ ) кристаллографически неэквивалентные позиции, если рассматривать вторые координационные сферы. Эти позиции равномерно распределены среди подрешеток C и Si. Двенадцать атомов во второй координационной сфере расположены подобно кубической "zinc-blende"-структуре для  $k$ -позиций и подобно гексагональной "wurtzite"-структуре для  $h$ -позиций. Спектр акцепторов скандия  $Sc_{\alpha_1}(LT)$ , у которых ось  $z$  направлена вдоль  $c$ -оси, мы можем отнести к гексагональной позиции скандия, тогда как центры  $Sc_{\alpha}(LT)$  — к квазикубическим позициям. Спектры ЭПР  $Sc_{\alpha_1}(LT)$ -центров исчезают, по-видимому, при повышении температуры, тогда как параме-

тры спектров ЭПР  $Sc_{\alpha}(LT)$ -центров при повышении температуры динамически усредняются и появляется высокотемпературная модификация этих центров  $Sc_{\alpha}(HT)$ . Из спектров ЭПР видно, что  $g$ -факторы, константы СТ-структуры и ширины линий для центров  $Sc_{\alpha}(LT)$  и  $Sc_{\alpha}(HT)$  изменяются с ориентацией в одинаковых пределах.

На рис. 4 приведены температурные зависимости интенсивностей спектров ЭПР нескольких центров скандия, наблюдавшихся в настоящей работе. При температурах выше 100 К спектры ЭПР центров скандия не наблюдаются.

## 2. Обсуждение результатов

В настоящей работе методом ЭПР были зарегистрированы спектры ЭПР по крайней мере четырех центров скандия с электронным спином  $S = 1/2$  и ядерным спином  $I = 7/2$ . при интерпретации спектров ЭПР полезно обсудить работы, в которых ранее наблюдались спектры ЭПР скандия в ряде ионных и полупроводниковых кристаллов. Эти работы следует разделить на две группы: к первой относятся исследования ионов  $Sc^{2+}$ , характеризующихся одним неспаренным  $3d$ -электроном и относящихся к переходным элементам, в кристаллах типа флюорита [12,13] и кубических кристаллах  $ZnS$  [14];

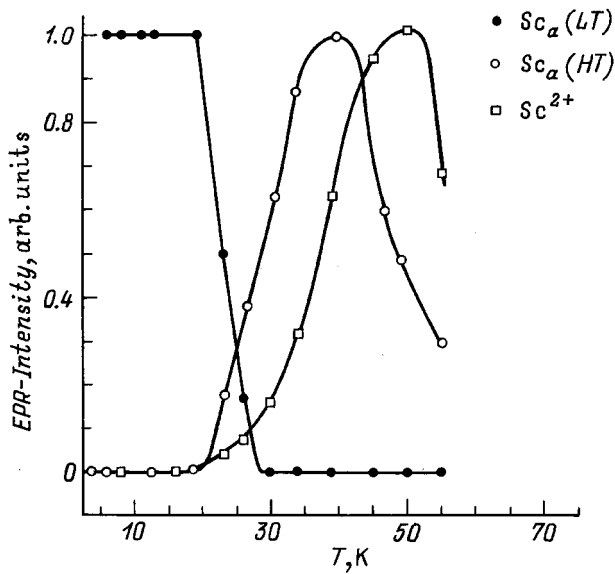


Рис. 4. Температурные зависимости относительных интенсивностей спектров ЭПР центров скандия.

ко второй — исследования дырок, локализованных на атомах третьей группы типа Al, Ga, Sc [15]. В последнем случае скандий уже не выступает как переходный элемент. Все ионы  $Sc^{2+}$  ( $3d$ ) были исследованы в кубических кристаллах, и во всех случаях наблюдался динамический эффект Яна-Теллера в орбитальном  $E$ -состоянии, вследствие которого анизотропия констант СТ-взаимодействия и  $g$ -факторов была частично подавлена. Константы СТ-взаимодействия для ионов  $Sc^{2+}$  в ZnS равны  $A_{\parallel} = 68 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  и  $A_{\perp} = 26 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ , что сравнимо с соответствующими параметрами для  $Sc^{2+}$  в  $6H$ -SiC. Уменьшение констант СТ-взаимодействия в SiC может быть следствием избыточного двукратного отрицательного заряда на скандии в SiC ( $A^{2-}$ ) по сравнению с ZnS, где скандий находится в нейтральном состоянии ( $A^0$ ). Увеличение же анизотропии в кристалле  $6H$ -SiC по сравнению с кубическим ZnS вполне естественно, так как в гексагональном кристалле динамический эффект Яна-Теллера подавлен. Сравнительно малая ширина линий сигналов ЭПР  $Sc^{2+}$ -центров также коррелирует с состоянием, характеризующимся неспаренным  $3d$ -электроном. Скандий по своим размерам может занимать только положение кремния в решетке SiC. Радиусы  $C^{4+}$ ,  $Si^{4+}$  и  $Sc^{3+}$ , взятые из таблиц фирмы "Bruker", равны 0.16, 0.42 и 0.732 Å соответственно. Выбор ионных радиусов базировался на упрощенном предположении, что кристалл SiC состоит из ионов Si в валентном состоянии  $Si^{4+}$  и связывающих электронов. В такой модели акцептор находится в валентном состоянии  $A^{3+}$ . Различие в ионных радиусах между скандием и кремнием равно +0.312, что существенно превышает соответствующее

соотношение для акцепторов Al (+0.09) и Ga (+0.20), занимающих, как известно, положение кремния.

Дополнительные слабые сателлиты, наблюдавшиеся с обеих сторон каждой линии в спектрах ЭПР ионов  $Sc^{2+}$  (рис. 1, 2), вызваны, по-видимому, взаимодействием неспаренного электрона с неэквивалентными ядрами  $^{29}Si$  во второй координационной сфере. Эти данные вполне коррелируют с результатами исследований других переходных элементов, например хрома или ванадия. В случае ионов  $Cr^{3+}$  наблюдалось взаимодействие с неэквивалентными ядрами  $^{29}Si$  во второй координационной сфере и сделан вывод о нецентральной позиции атома хрома, замещающего кремний [16].

Спектры ЭПР, приписываемые нами акцепторам скандия, больше коррелируют со спектрами дырок, локализованных на атомах третьей группы, в том числе и на атомах скандия в  $GeO_2$ . При анализе следует принимать во внимание отношение констант СТ-взаимодействия для этих дырок, локализованных на атомах Al, Ga и Sc, и затем сравнивать соответствующее отношение для акцепторов Al, Ga и Sc в карбиде кремния. При этом мы можем использовать данные для акцепторов Al и Ga, полученные нами в [8,17]. Константа СТ-взаимодействия для дырки на Ga примерно в 2 раза больше соответствующей константы для дырки на Sc в  $GeO_2$ . По нашим данным, константа СТ-взаимодействия для акцепторов Ga равна примерно  $35 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ , т. е. соответствующая константа для Sc оценивается как  $\sim 15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ , что и реализуется в спектрах ЭПР. При этом следует сравнивать изотропные части констант СТ-взаимодействия.

Таким образом, представляется весьма вероятным, что наблюдаемые спектры ЭПР  $Sc_{a1}(LT)$ ,  $Sc_a(LT)$  и  $Sc_a(HT)$  принадлежат акцепторам скандия. Предполагается, что скандий замещает кремний и находится в регулярном окружении подобно мелким акцепторам бора, алюминия и галлия. При этом симметрия спектров ЭПР для низкотемпературной фазы, в которых проявляется несколько магнитно-неэквивалентных центров, обусловлена перераспределением спиновой плотности и, возможно, нецентральным положением атома скандия. Альтернативная возможность — это дефект типа глубокого бора [8,17], т. е. центр обладает более сложной структурой и наряду с атомом скандия в него входит другой дефект, например углеродная вакансия. Следует отметить, что симметрия центра  $Sc_{a1}(LT)$  близка к симметрии пары Ti-N [18,19], однако характерной для атомов азота СТ-структуры не наблюдалось.

Спектры ЭПР скандия, зарегистрированные традиционным методом ЭПР в настоящей работе, не совпадают с наиболее интенсивными сигналами, наблюдавшимися ранее в ОДМР-исследованиях [5–7]. Это свидетельствует в пользу того, что в ОДМР-исследованиях, по-видимому, наблюдались экситоны

с электронным спином  $S > 1/2$ , локализованные на ионизированных изоэлектронных акцепторах скандия, подобно тому как в кристаллах с примесью титана были зарегистрированы спектры ОДМР триплетных экситонов, локализованных на изоэлектронной нейтральной примеси титана [20]. Как и в случае с титаном, спектры ЭПР экситонов не могут быть зарегистрированы традиционным методом ЭПР из-за короткого времени жизни и, следовательно, низкой концентрации. В связи с обнаружением бесфононных линий в спектре люминесценции скандия 430.8 и 434.9 nm при температуре 1.8 K [8,21], близких по положению к бесфононным линиям экситонов, локализованных на титане, аналогия между скандием и титаном проявляется и в спектре люминесценции. Это служит дополнительным подтверждением вывода, сделанного в [8] и в настоящей работе, о том, что спектры ОДМР соответствуют экситонам, связанным со Sc. Следует, однако, добавить, что в спектрах ОДМР нами наблюдались также неразрешенные линии в области  $g$ -фактора 2.0 со слабой анизотропией, которые по своему положению в магнитном поле более или менее коррелируют со спектрами ЭПР акцепторов скандия, зарегистрированными в настоящей работе.

Авторы выражают благодарность Ю.А. Водакову за полезные дискуссии и В. Грачеву за предоставление его программы "R-Spectr" для расчетов спектров ЭПР.

Работа была частично поддержана фондом VW по гранту I/70958 и РФФИ по гранту № 96-02-16927.

## Список литературы

- [1] Х. Вахмер, Ю.М. Таиров. ФТТ **11**, 8, 2400 (1969).
- [2] Г.А. Ломакина, В.И. Соколов, Ю.А. Водаков. ФТП **16**, 7, 1244 (1982).
- [3] В.С. Балландович. ФТП **25**, 2, 287 (1991).
- [4] Ю.А. Водаков, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.Г. Одинг, В.В. Семенов, В.И. Соколов. В кн.: Проблемы физики и технологии широкозонных полупроводников. Л. (1979). С. 164.
- [5] P.G. Baranov, N.G. Romanov, V.A. Vetrov, V.G. Oding. Proc. 20th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors / Ed. E.M. Anastassakis and J.D. Joannopoulos. World Scientific, Singapore (1990). V. 3. P. 1855.
- [6] P.G. Baranov, N.G. Romanov. Appl. Mag. Res. **2**, 361 (1991).
- [7] P.G. Baranov, N.G. Romanov. Mat. Sci. Forum **83–87**, 1207 (1992).
- [8] П.Г. Баранов, Е.Н. Мохов. ФТТ **38**, 5, 1446 (1966).
- [9] P.G. Baranov, E.N. Mokhov. Proc. 23d Int. Conf. on Physics of Semicond. Berlin (1996); P.G. Baranov, E.N. Mokhov. Proc. 7th Int. Conf. on Shallow-Level Centers in Semicond. Amsterdam (1996).
- [10] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov. Diffusion and Solubility of Impurities in Silicon Carbide: Silicon Carbide-1973. South Carolina Univ. Press. (1974). P. 508–519.
- [11] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov, M.G. Ramm, A.D. Roenkov. Krist. und Techn. **14**, 729 (1979).
- [12] U.T. Hochli. Phys. Rev. **162**, 262 (1967).
- [13] J.R. Herrington, T.L. Estle, L.A. Boatner. Phys. Rev. **B5**, 2500 (1972); J.R. Herrington, L.A. Boatner, T.J. Aton, T.L. Estle. Phys. Rev. **B10**, 833 (1974).
- [14] A.O. Barksdale, T.L. Estle. Phys. Lett. **42A**, 426 (1973).
- [15] R.B. Bossoli, T.J. Welsh, O.R. Gilliam, M. Stapelbroek. Phys. Rev. **B19**, 4376 (1979).
- [16] P.G. Baranov, V.A. Khramtsov, E.N. Mokhov. Semicond. Sci. Technol. **9**, 1340 (1994).
- [17] P.G. Baranov, I.V. Ilyin, E.N. Mokhov. Solid State Commun. In press (1996).
- [18] В.С. Вайнер, В.А. Ильин, В.А. Карачинов, Ю.М. Таиров. ФТТ **28**, 2, 363 (1986).
- [19] K. Maier, J. Schneider, W. Wilkening, S. Leibenzeder, R. Stein. Mater. Sci. Eng. **B11**, 27 (1992).
- [20] K.M. Lee, Dand Le Si, G.D. Watkins, W.J. Choyke. Phys. Rev. **B32**, 2273 (1985).
- [21] C. Haberstroh. University of Erlangen-Nurnberg. Ph.D thesis (1993).